

PMR3411 - Projeto de Máquinas

Mecatrônica - EPUSP

# Acionamentos e Sensores para Máquinas CNC

Gilberto F. Martha de Souza

Julio Cezar Adamowski

setembro/2020

# Acionamentos → Motores elétricos

## Características:

linearidade

torque

velocidade

geração de calor

massa

## Principais tipos de motor elétrico:

motor CA de indução

motor *Brushless* (CA e CC) → mais utilizado

motor CC

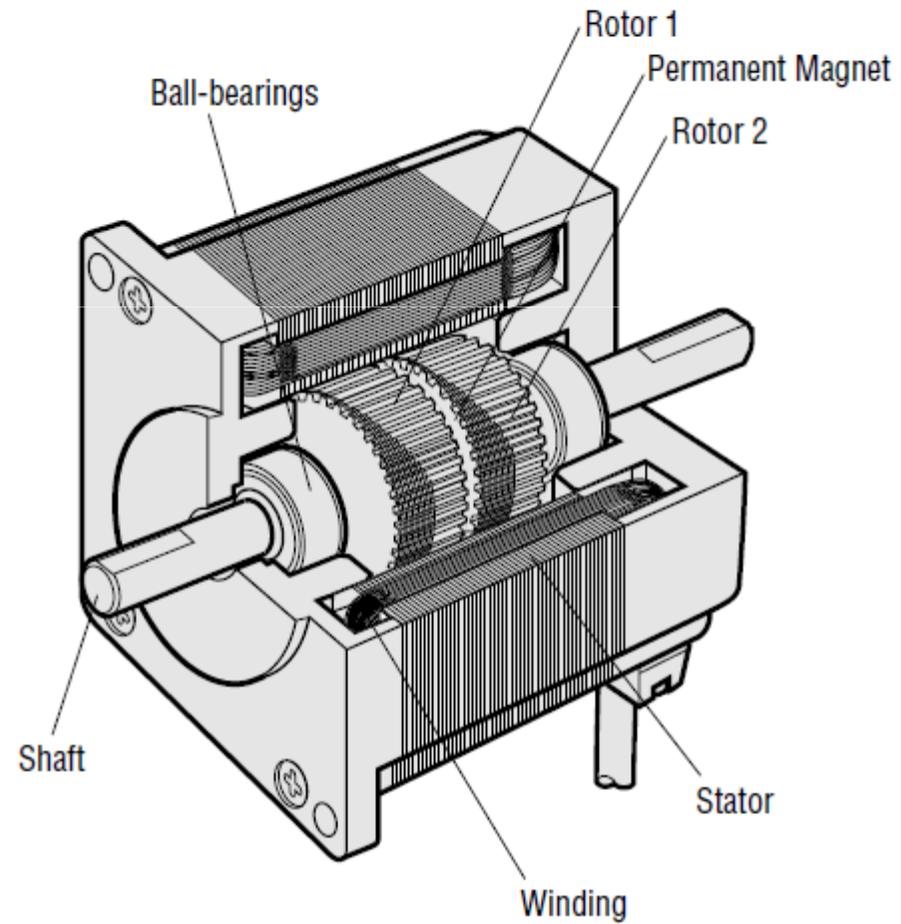
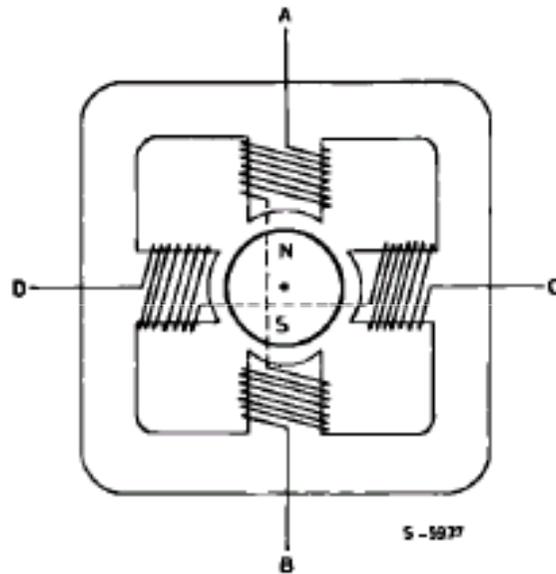
motor de passo → baixo custo e fácil de controlar

# Motor de passo

Imã permanente

Relutância variável

Híbrido

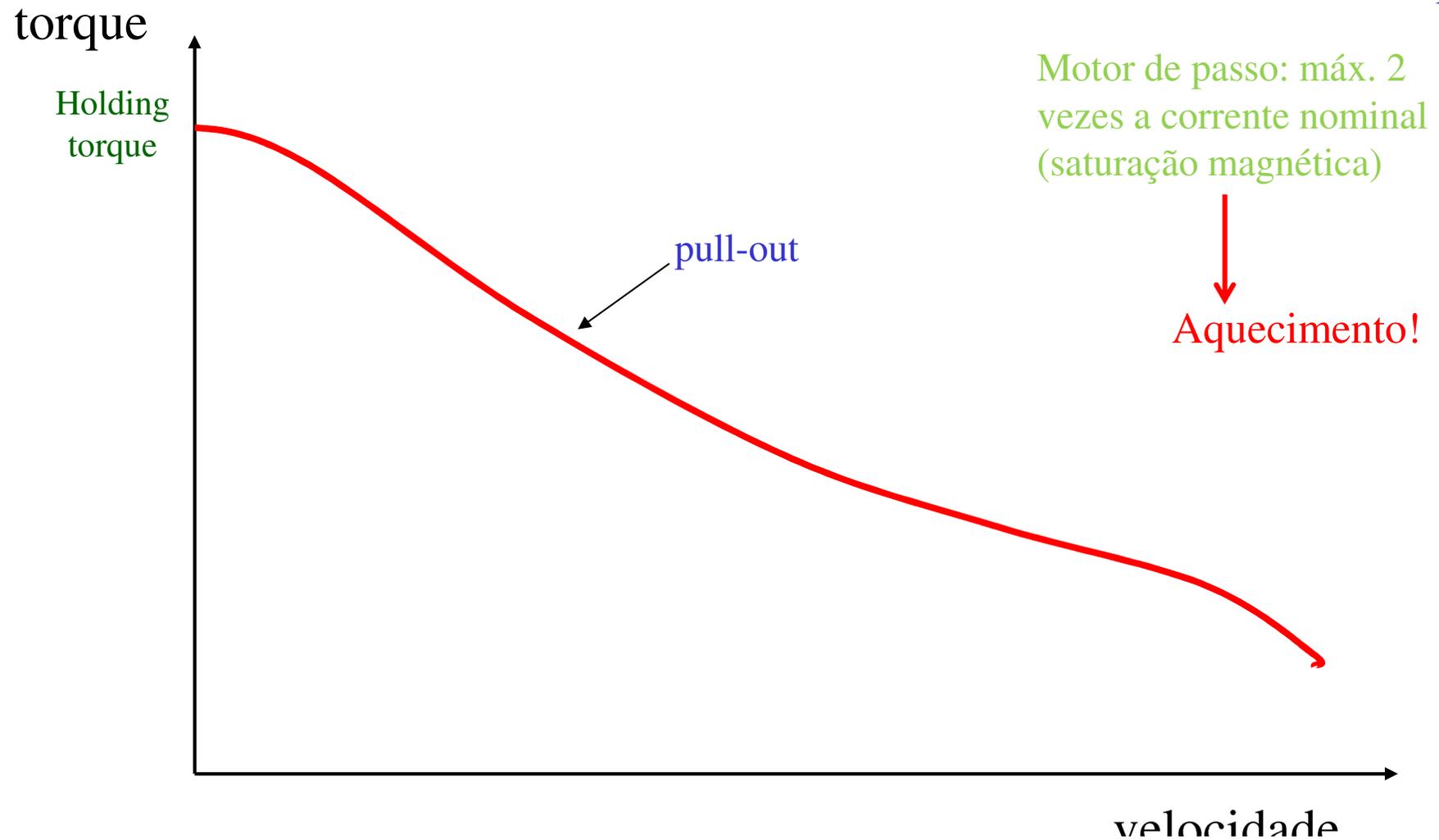


## Curva torque x velocidade: motor de passo

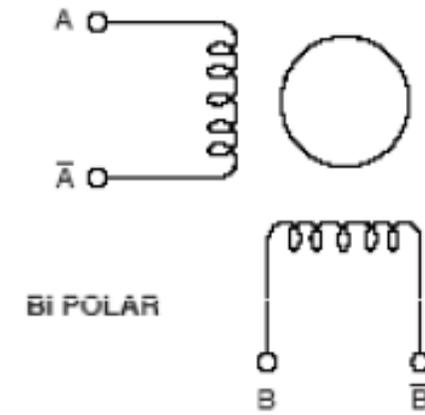
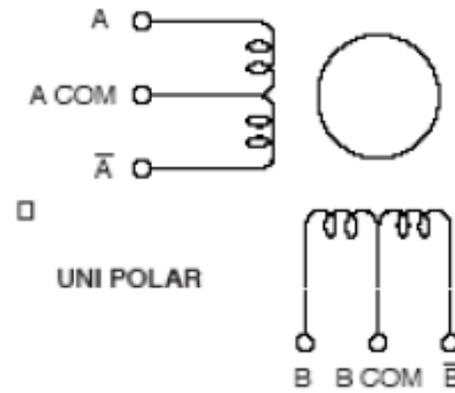
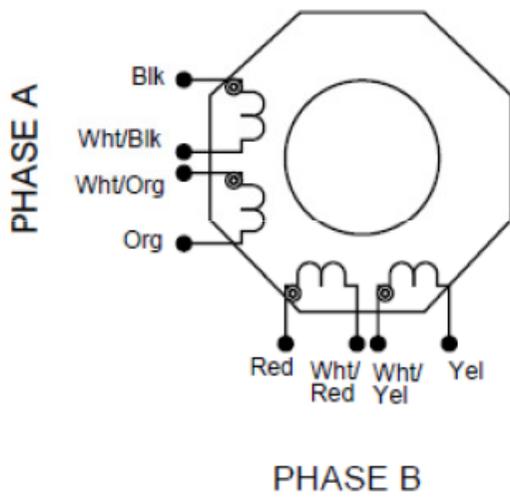
Corrente nominal e velocidade zero → holding torque

Curva de torque x velocidade depende do tipo de acionamento eletrônico

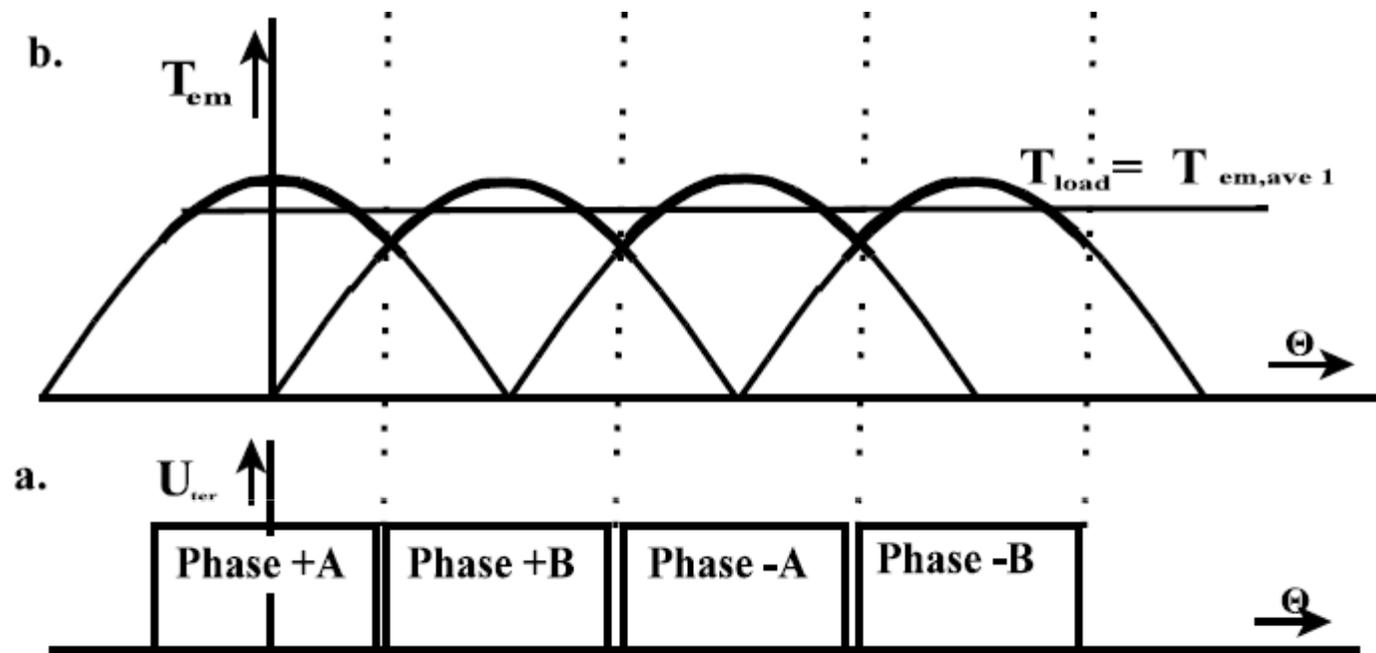
aumento da corrente → aumento do torque



# Enrolamentos do motor de passo 4 fases

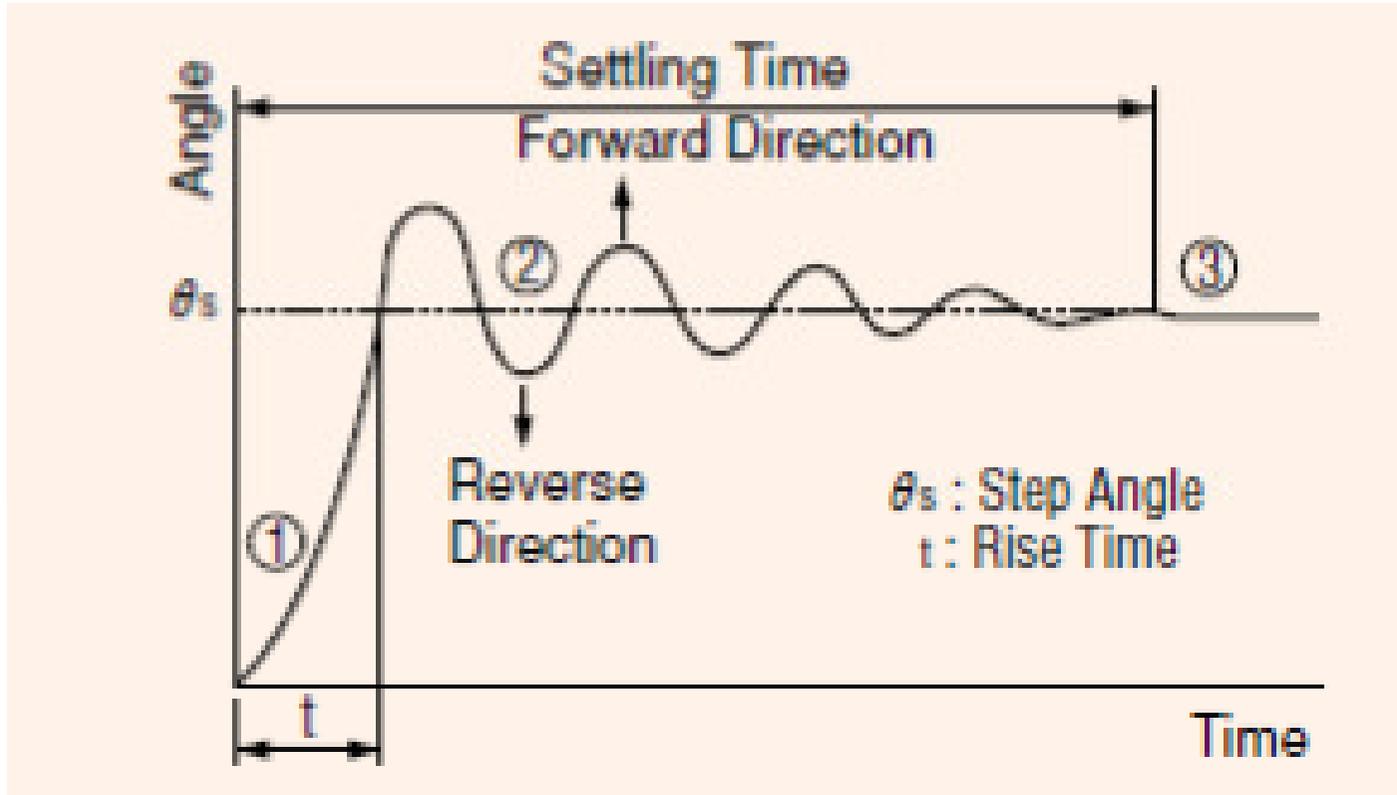


## Acionamento das fases



Curto circuitando as 4 fases, o motor se transforma num freio eletromagnético (holding torque)

## Resposta dinâmica: 1 passo



$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_m}{J_r}}$$

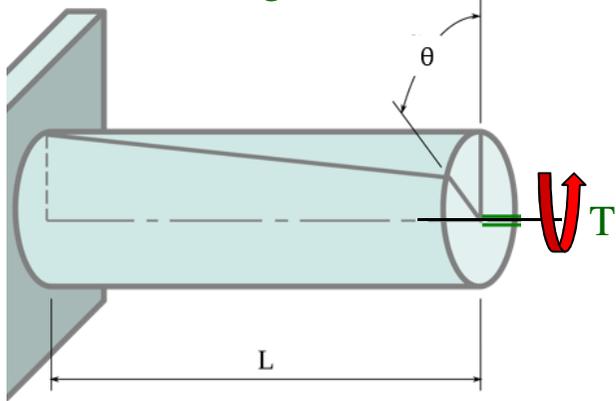
$k_m$  = rigidez magnética

$J_r$  = inércia do rotor

# Rigidez magnética

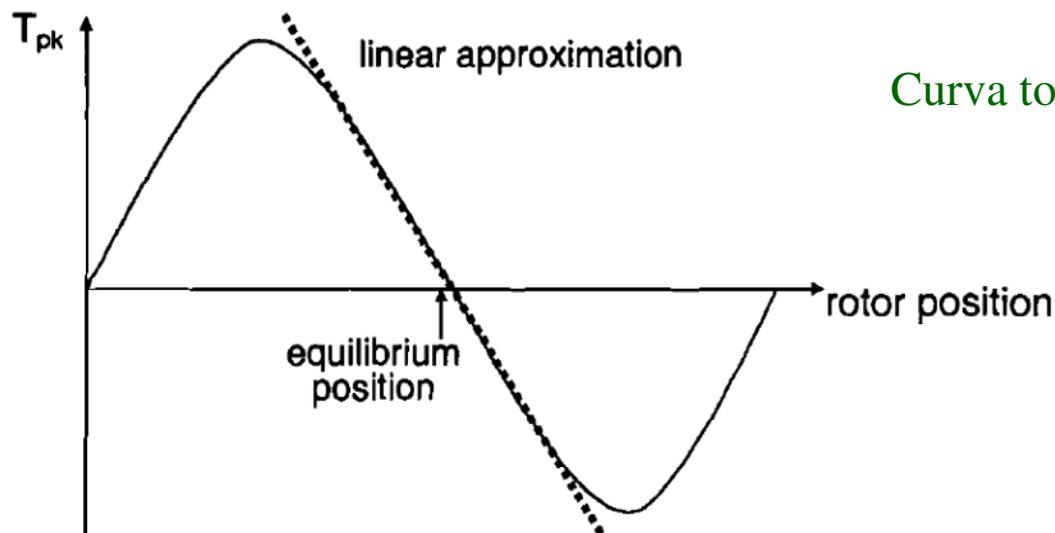
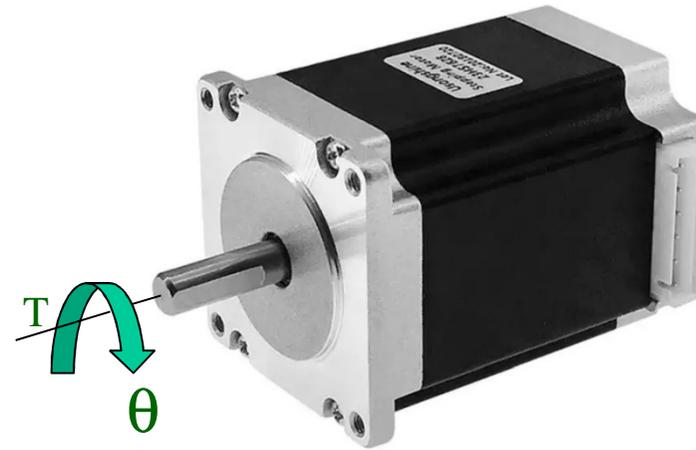
Relembrando:

rigidez torsional



$$k_{\theta} = \frac{T}{\theta} = \frac{GJ}{L}$$

Aplicar torque ao eixo do motor de passo com uma fase energizada



Curva torque x deslocamento angular

## Características mecânicas

Frequência natural (ressonância)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{NT_0}{J_r}}$$

$N$  = número de polos no rotor

$T_0$  = torque máximo

$J_r$  = inércia do rotor

Exemplo:

Motor de passo híbrido de 4 fases:

Número de polos no rotor  $N = 50$

Inércia do rotor  $J_r = 1,16 \times 10^{-5} \text{kgm}^2$

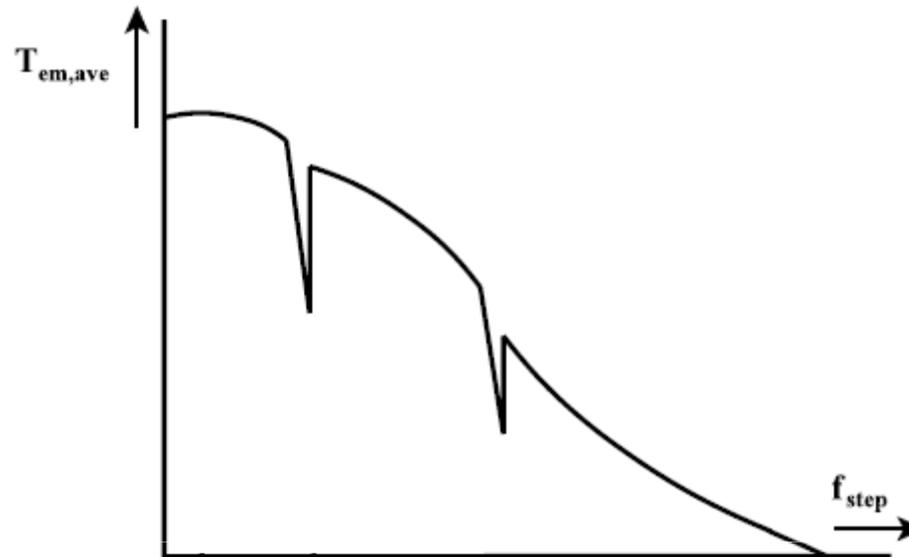
Resistência do enrolamento  $R = 0,66 \Omega$

Indutância  $L = 1,52 \times 10^{-3} \text{H}$

Corrente nominal  $I_0 = 2 \text{A}$

Torque ( $I_0 = 2 \text{A}$ )  $T_0 = 0,242 \text{Nm}$

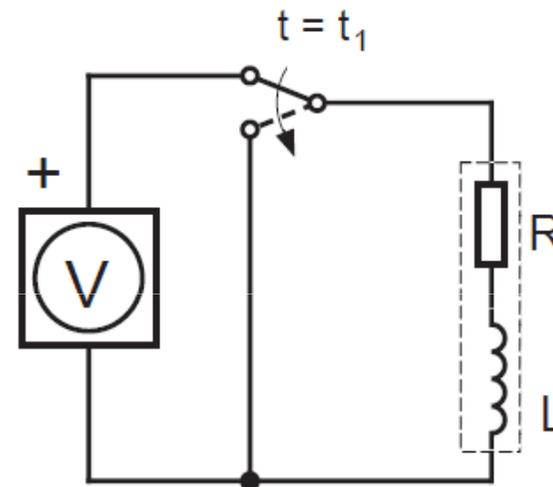
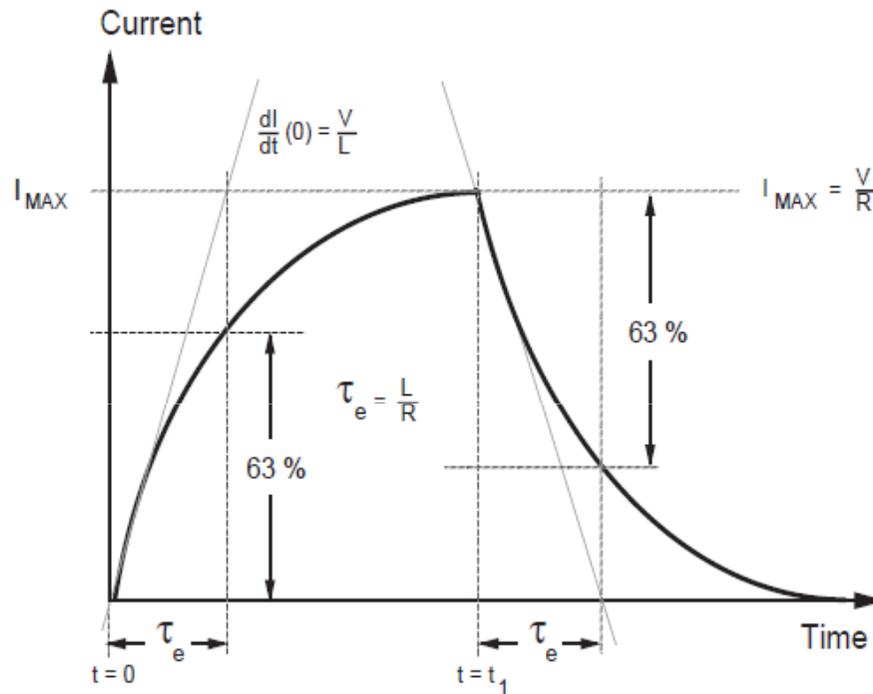
$$f_0 = 162 \text{passos/s}$$



# Características elétricas do motor de passo

$L$  = indutância do enrolamento

$R$  = resistência elétrica



Constante de tempo elétrica:  $\tau_e = \frac{L}{R}$

Exemplo:  $L = 1,52 \times 10^{-5} \text{H}$  e  $R = 0,66 \Omega \longrightarrow \tau_e = 2,3 \text{ms}$

Taxa máxima de passos/s = 434

# Acionamento elétrico

Como reduzir a constante de tempo elétrica?

Aumentar a resistência: com uma resistência em série de  $11,34\Omega$   $\longrightarrow$   $\tau_e = 0,13\text{ms}$

Taxa máxima de passos/s = 7692

Para manter corrente 2A, aplica-se tensão de 24V

Dissipação passa de 2,64W para 48W

Acionamento tipo chopper:

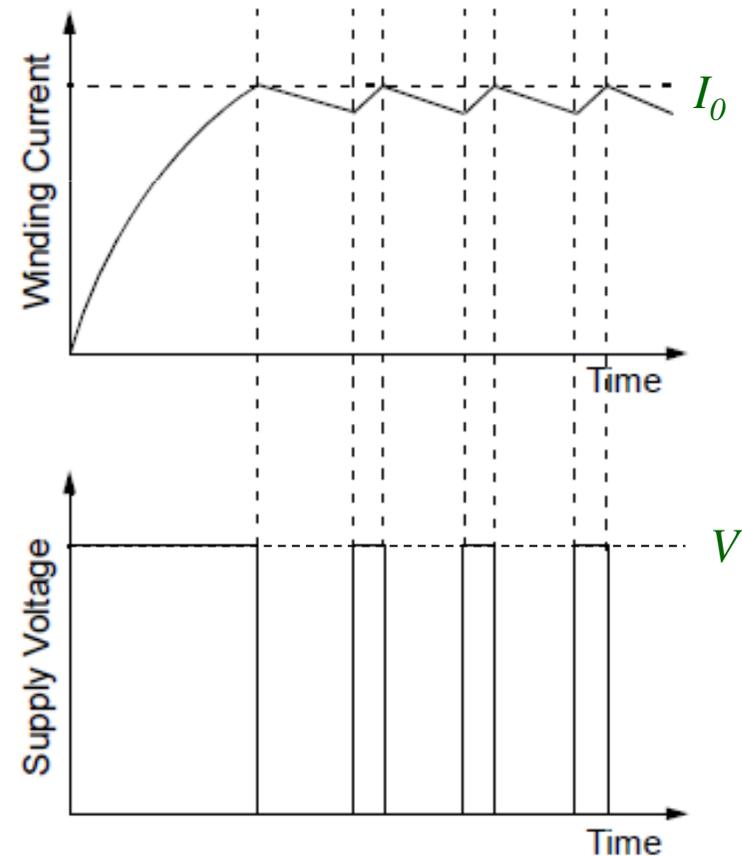
$$\tau_e = \frac{I_0 L}{V}$$

$I_0$  = corrente nominal do motor

$V$  = tensão de alimentação do chopper

$V = 24\text{V}$  e  $I_0 = 2\text{A}$   $\longrightarrow$   $\tau_e = 0,13\text{ms}$

Dissipação de 2,64W

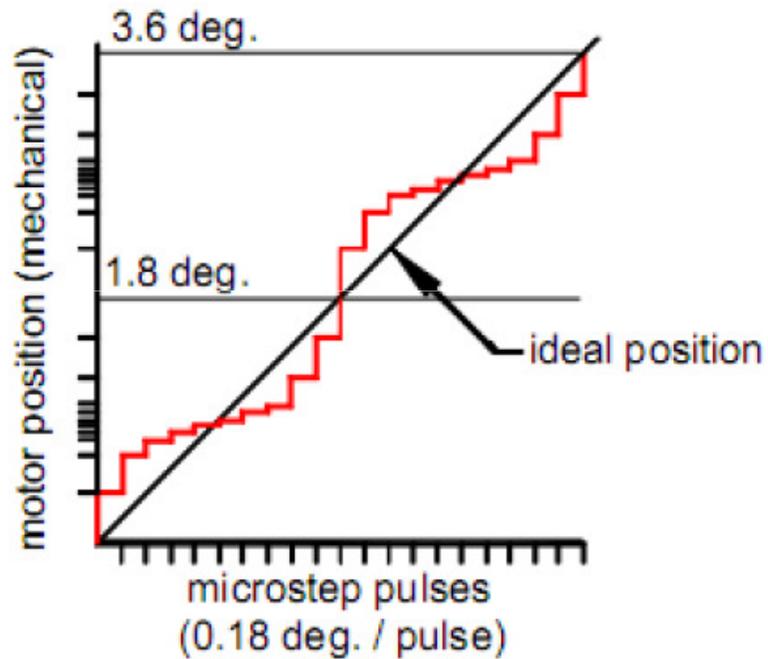


# Acionamento elétrico

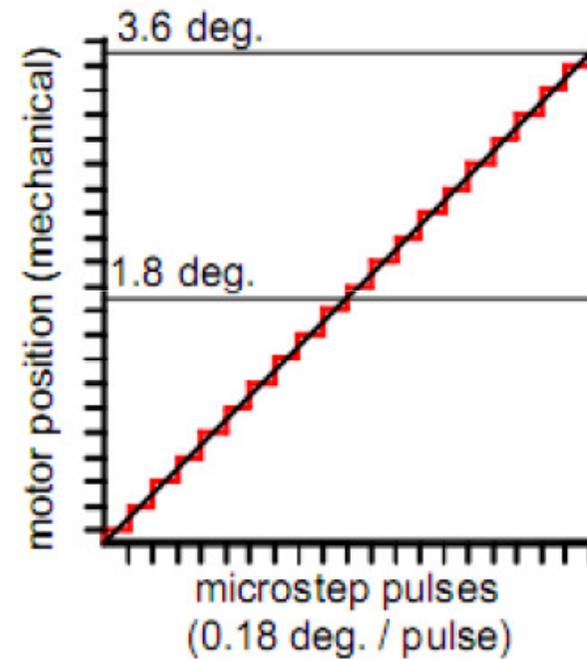
## Micropasso

Comportamento depende da precisão de fabricação do motor

Motor pouco linear



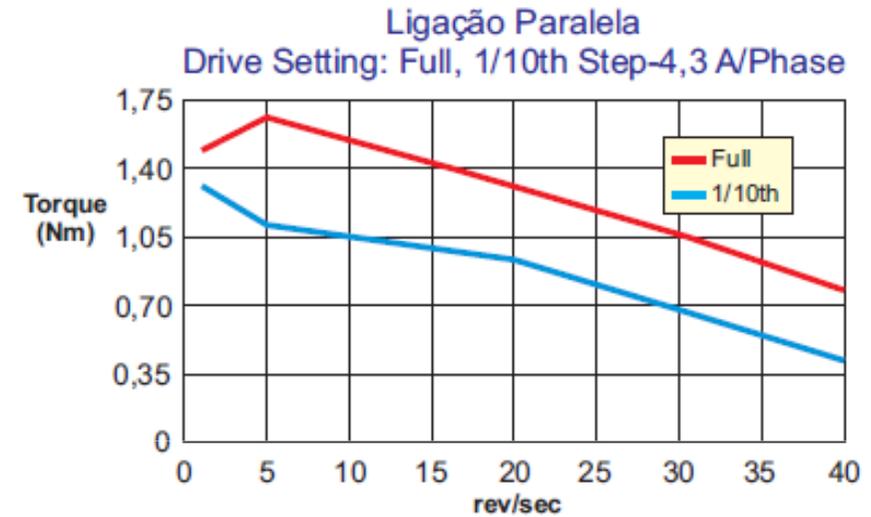
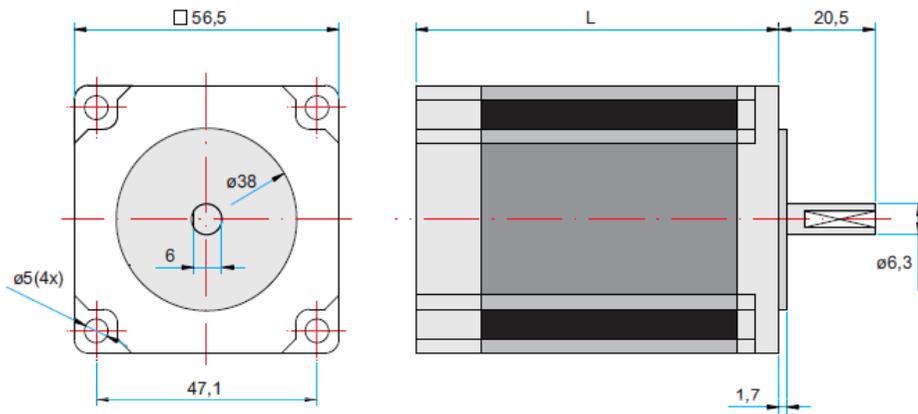
Motor muito linear



Motores usados em PMR3411

# Motor de passo HT23-401

curva de torque x velocidade



MODELO	LIGAÇÃO DO MOTOR 1=SÉRIE 2=PARALELO 3=UNIOLAR	COMPRIMENTO "L" (mm)	MINÍMO TORQUE ESTÁTICO (N.m)	FIOS	STEP (ÂNGULO)	VOLTS	AMPS	OHMS	mH	ROTOR INÉRCIA (g.cm <sup>2</sup> )	MOTOR PESO (Kg)
KTC-HT23-401	1	76	1,86	8	1,8	4,2	2,12	2,0	6,4	480	1,00
	2					2,1	4,24	0,5	1,6		
	3					3,0	3,00	1,0	1,6		

## Principais problemas nos motores de passo

Tem operação limitada a baixas rotações: limitação na velocidade de chaveamento das fases

Não suporta picos de torque: perde sincronismo

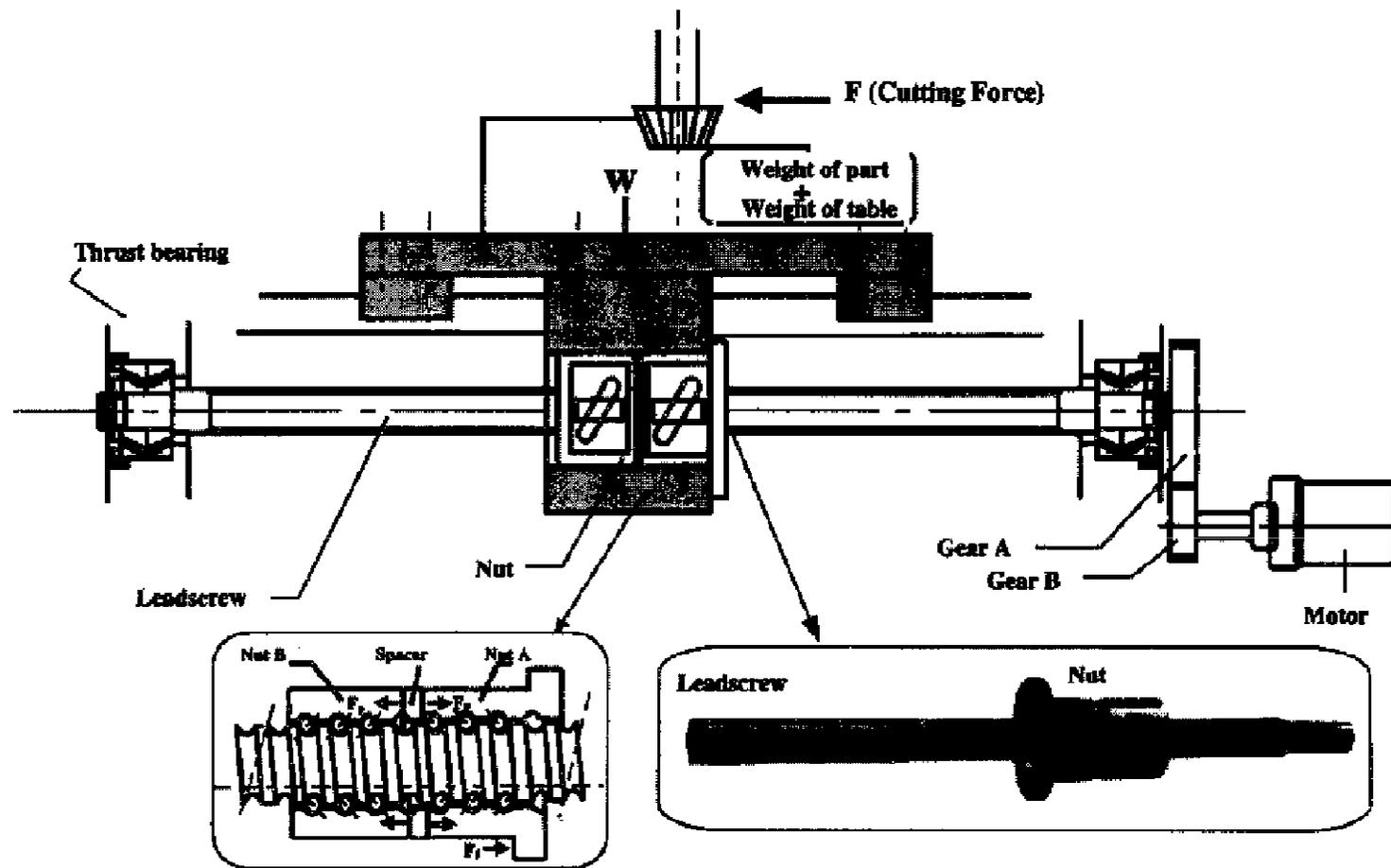
Grande relação massa/potência do motor

Torque de retenção devido aos ímãs permanentes: variação de torque

## Dimensionamento mecânico

Torque, rotação, inércia do rotor, potência, massa do motor

## Sistema de acionamento: cálculo do torque no motor



Fuso: comprimento  $l$ , diâmetro  $d_f$ , passo  $p$ , massa  $m_f$

momento de inércia de massa  $J_f$

## Torque estático devido ao atrito nas guias

$$T_{e\mu} = \frac{p}{2\pi} \mu_g \left[ (m_m + m_p)g + F_{cn} \right]$$

$p$  = passo do fuso

$m_m$  = massa da mesa

$m_p$  = massa da peça

$\mu_g$  = coeficiente de atrito das guias

$F_{cn}$  = componente da força de corte normal à mesa

Coeficiente de atrito de rolamento muito pequeno  
~0,01

## Torque devido à força de corte

$$T_{fc} = \frac{p}{2\pi} F_c$$

$F_c$  = força de corte

## Torque devido às cargas dinâmicas

Cargas dinâmicas: inércia do rotor do motor e inércia da carga refletida no eixo do motor

Inércia do conjunto peça e mesa:  $J_p$

$$J_p = (m_m + m_p) \left( \frac{p}{2\pi} \right)^2$$

Inércia da carga:  $J_c$

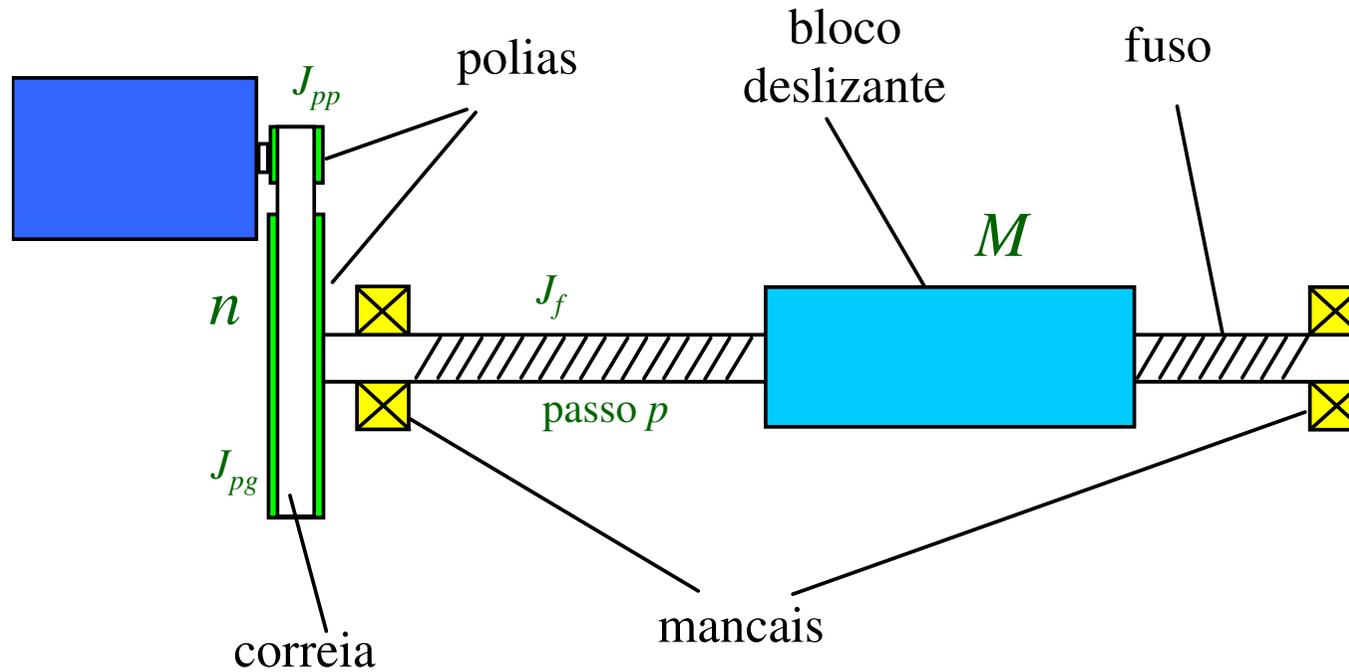
$$J_c = J_f + J_p \qquad J_f = \frac{1}{2} m_f \left( \frac{d_f}{2} \right)^2 \quad (\text{inércia do fuso})$$

Torque a ser fornecido pelo motor:  $T$

$$T = \alpha(J_r + J_c) + T_{e\mu} + T_{fc}$$

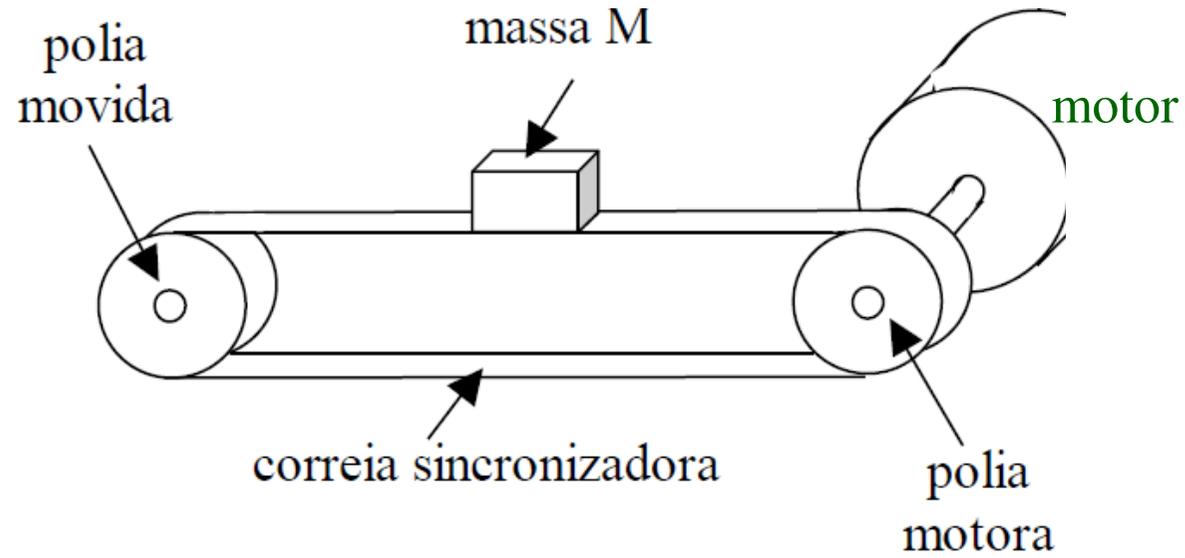
$J_r$  = inércia do rotor do motor

## Exemplo: inércia da carga



$$J_c = J_{pp} + \left(\frac{1}{n}\right)^2 \left[ J_{pg} + J_f + M \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2 \right]$$

## Exemplo: inércia da carga

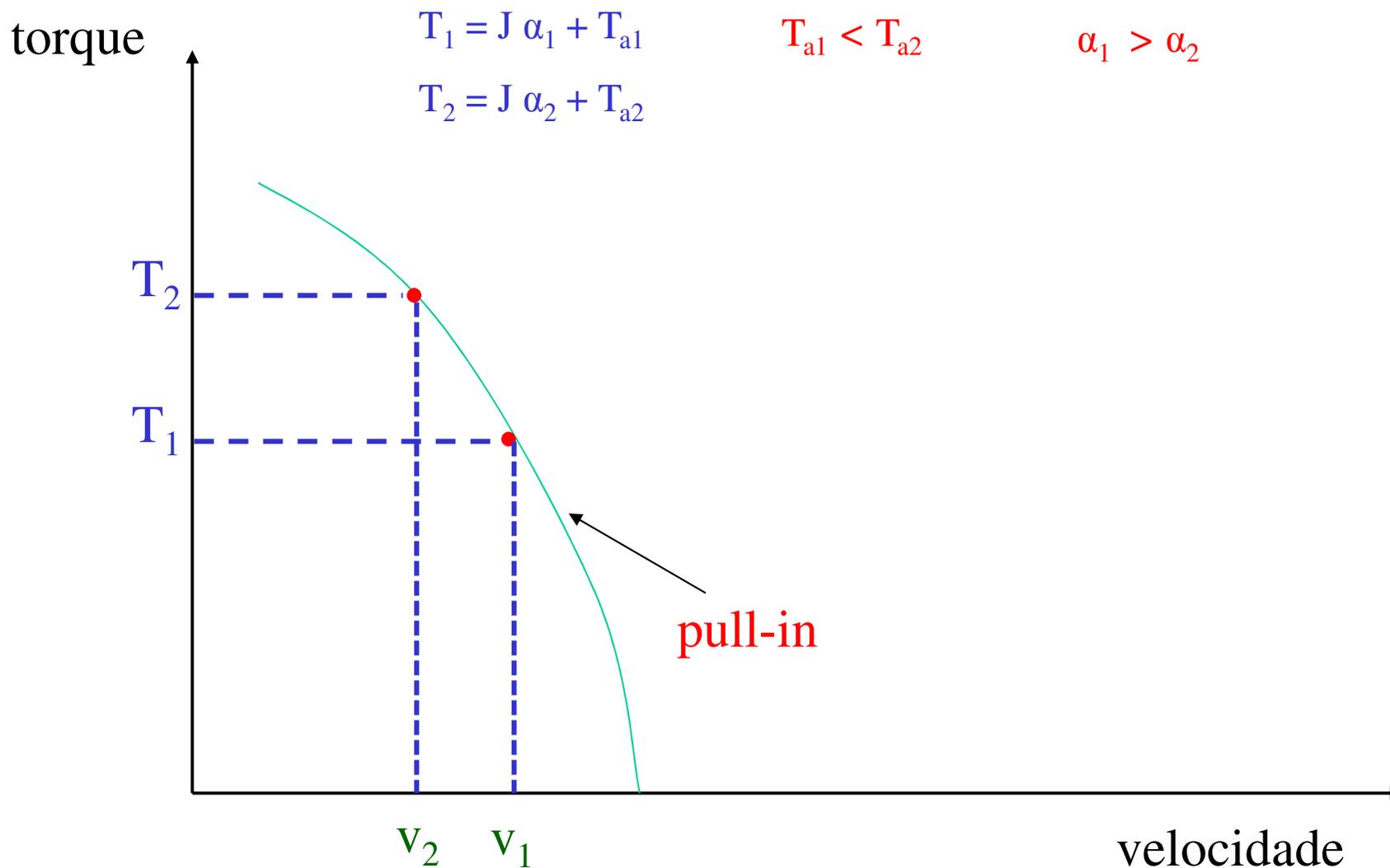


$$J_{carga} = 2J_{polia} + Mr^2$$

## Curvas de torque x velocidade do motor de passo

Curva pull-in:  $T = J \alpha + T_a$       $T_a$  = torque resistente (atrito, força de corte)

Velocidade  $v$  atingida num único passo, depois mantém velocidade  $v$ .



# Curva pull-out

Curva pull-out:  $T = J \alpha$  carga inercial

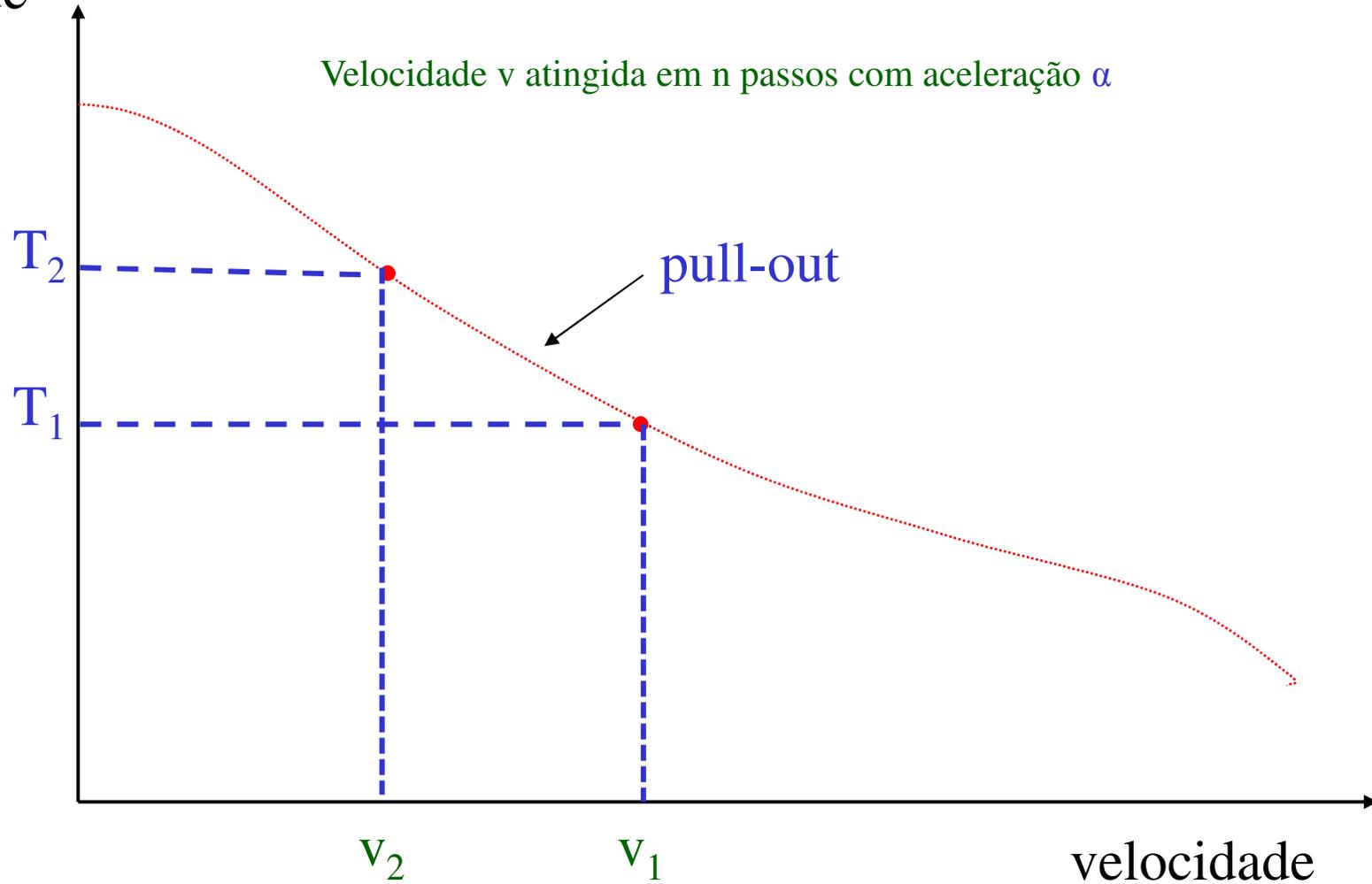
$$T_1 = J \alpha_1$$

$$T_2 = J \alpha_2$$

$$\alpha_1 < \alpha_2$$

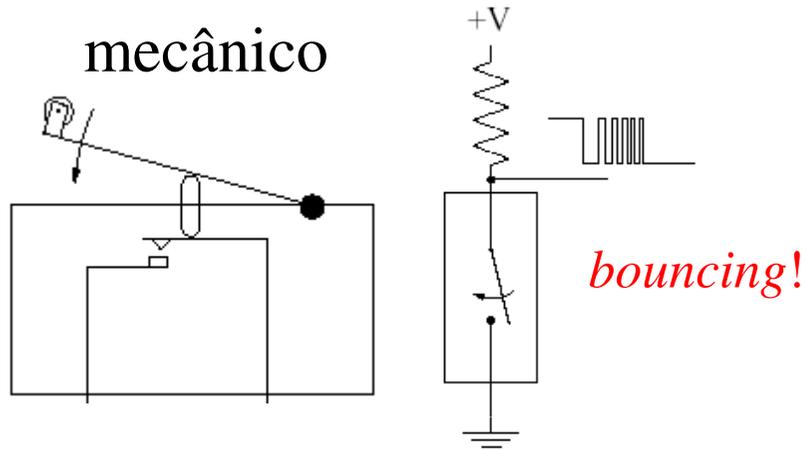
torque

Velocidade  $v$  atingida em  $n$  passos com aceleração  $\alpha$



# Sensores

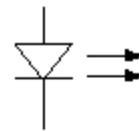
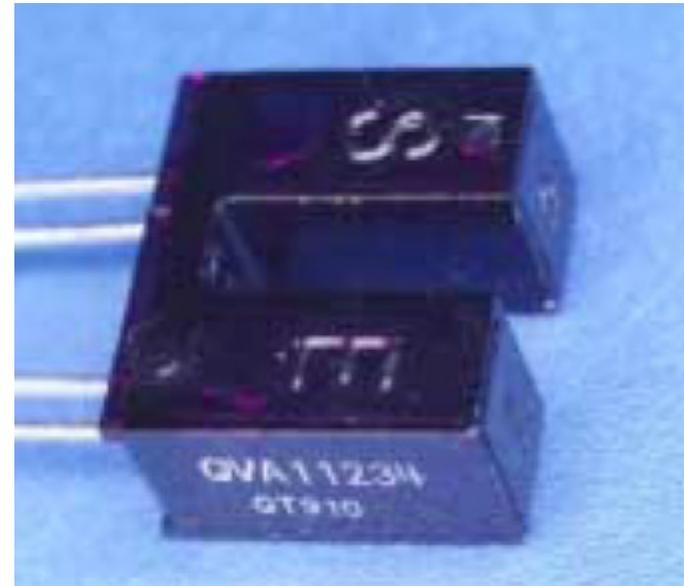
Chaves de fim de curso:



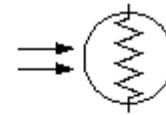
magnético



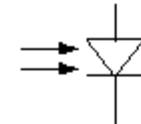
óptico



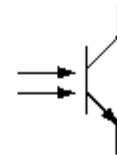
LED



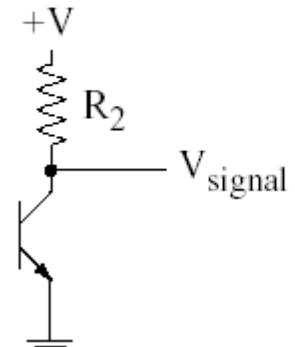
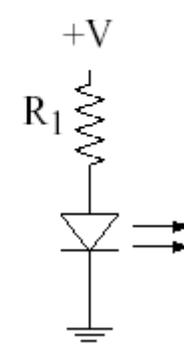
photoresistor



photodiode

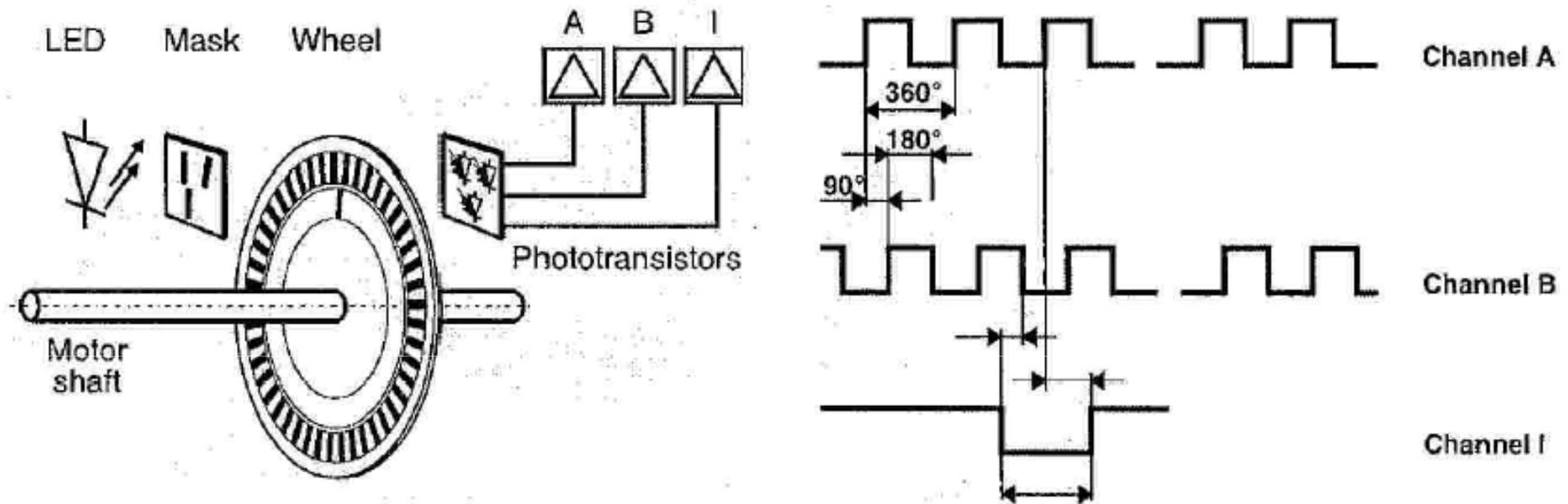


phototransistor



typical configuration

# Encoder óptico incremental



- Sentido de movimento
- vibração